

**В. Г. СЫЧЕНКО**, докт. техн. наук, проф., Днепропетровский национальный университет ж.-д. транспорта;  
**А. А. МАТУСЕВИЧ**, докт. техн. наук., проректор Днепропетровский национальный ун-т ж.-д. транспорта;  
**А. В. РОГОЗА**, студентка, Днепропетровский национальный университет ж.-д. транспорта;  
**М. Е. ПАВЛИЧЕНКО**, ООО ДДК, Екатеринбург, Россия;  
**И. Л. ВАСИЛЬЕВ**, УрГУПС, Екатеринбург, Россия;  
**Н. Н. ПУЛИН**, и.о. нач. Службы электроснабжения рег. филиала «Львівська залізниця».

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В ЭВОЛЮЦИОНИРУЮЩИХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

**Введение.** Та конфигурация электроэнергетики, которую мы сейчас имеем, сложилась исторически. Крупные генерирующие мощности с высоким коэффициентом полезного действия вытеснили маломощные источники энергии. За централизацию генерирующих мощностей пришлось заплатить сотнями километров линий электропередач (ЛЭП) и многоступенчатой трансформацией энергии с соответствующими потерями и снижением надежности. Эта система уязвима и повреждения могут распространяться на большие территории в зависимости от поврежденной ступени напряжения ЛЭП.

Однако, бесперебойное снабжение электроэнергией является важнейшей составляющей жизнеобеспечения современной среды обитания людей, эффективного функционирования общественного производства. Перемены в электроснабжении по масштабам ущерба могут быть причислены к наиболее опасным видам бедствий, нанесящим удар по национальной экономике и по благополучию людей. Поэтому основной целью функционирования электроэнергетической отрасли является надежное и экономичное снабжение потребителей электрической энергией требуемого качества.

Традиционно вопрос качества электроэнергии был, в основном, проблемой электрифицированного железнодорожного транспорта и крупных промышленных предприятий, но сегодня эта проблема касается всех потребителей, в том числе коммунальной инфраструктуры, населения, государственных учреждений.

Низкое качество электроэнергии может приводить к сокращению срока службы изоляции электрических машин и аппаратов, к ухудшению работы батарей конденсаторов, к сбоям в работе систем управления, релейной защиты, автоматики, телемеханики, связи и вычислительной техники. Кроме этого, появляются дополнительные активные потери в электрических машинах, трансформаторах и сетях, в некоторых случаях они могут составлять до 20% потребляемой мощности.

В последнее время появился ряд новых требований, которые определяют развитие электроэнергетики на ближайшее десятилетие. К их числу, в частности, относятся возросшие требования потребителей к качеству электроэнергии и надежности электроснабжения [1]. Особое место при этом имеет живучесть электроэнергетической системы (ЭЭС) как ее свойство противостоять возмущениям, не допуская их каскадного развития с массовыми нарушениями питания потребителей, и обеспечивать быстрое восстановление нормального или близкого к нему состояния системы. Обеспечение надежности ЭЭС достигается [2]:

- повышением надежности энергооборудования посредством использования достижений научно-технического прогресса в части новых, более прочных, химически стойких, огнестойких, жаропрочных, безопасных материалов и технологий, а также качественным изготовлением оборудования, узлов, конструкций на энергомашиностроительных предприятиях и монтажа строительными организациями;

- введением обоснованной технико-экономическими расчетами избыточности;

- выбором и внедрением эффективной системы технического обслуживания и ремонтов (СТОиР);

- рациональной организацией всех видов ремонтов, реконструкции и модернизации оборудования;

- применением всех видов диагностирования оборудования с целью оценки его текущего состояния, обнаружения дефектов и прогнозирования остаточного ресурса;

- применением эффективной системы тренажерной подготовки персонала на базе современных научно-эргономических подходов;

- использованием достижений научно-технического прогресса в области информационных технологий и новых технических средств управления, позволяющих совершить скачок в создании смарт-грид-систем с большой степенью самоуправляемости как в нормальных, так и аварийных режимах.

Сейчас появились новые технологии, существенно влияющие на обеспечение надежности ЭЭС. В первую очередь следует отметить:

- новое поколение коммутационной аппаратуры для всех классов напряжения с практически неограниченным ресурсом и КРУЭ, что позволяет пересмотреть задачи надежности подстанций, в т. ч. с упрощением схем распределительных устройств и повышением степени автоматизации производства оперативных переключений, реконфигурации электрической сети;

- стремительное развитие силовой электроники и новых материалов, что обуславливает новые возможности для применения дальних линий электропередачи постоянного тока, управляемых передач переменного тока,

в том числе в сочетании с электропередачами постоянного тока, и широкие перспективы обеспечения качественного регулирования напряжения в электрических сетях, радикального повышения управляемости, надежности и живучести ЭЭС;

– большой прогресс в области изоляции электрооборудования, за счет которой существенно повысилась надежность кабельных линий, а также расширилась область применения газоизолированного оборудования и др.

Еще более существенные возможности открывает подготавливаемое к массовому производству второе поколение «высокотемпературных» сверхпроводников, способных работать при температурах вплоть до температуры жидкого азота, достижение которой в сотни раз более экономично, чем достижение гелиевого уровня температур. Оценки показывают, что после освоения «высокотемпературных» сверхпроводников стоимость такого провода будет сравнима со стоимостью резистивных проводов. Следует ожидать, что в ближайшие годы начнется освоение в тяговой и стационарной энергетике нового сверхпроводникового электротехнического оборудования, основанного на «высокотемпературной» сверхпроводимости, которое не только по физико-техническим показателям, но и коммерчески будет превосходить традиционное электрооборудование [3].

Чаще всего существующие системы электроснабжения эксплуатируются не в номинальных режимах, а электрооборудования и сети ЭЭС оказываются недогруженными или перегруженными. Это приводит к увеличению части потерь в трансформаторах и оборудовании, к снижению коэффициента мощности в системах электроснабжения. Причинами низкой энергоэффективности систем электроснабжения являются:

- техническая изношенность электрооборудования, которое отработало свой расчетный ресурс, что существенно снижает безопасность обслуживания узлов нагрузки и надежность всей системы электроснабжения;
- нерациональные режимы работы основного электрооборудования;
- устаревшие схемные решения питающих и распределительных сетей;
- значительные перетоки реактивной мощности в сетях;
- стабильная неравномерность суточных графиков нагрузок потребителей;
- существенные отклонения показателей качества электроэнергии от нормируемых.

Повышение эффективности функционирования ЭЭС может достигаться через снижение потерь электрической энергии в системе трансформации, распределения и преобразования (трансформаторы, распределительные сети, электродвижущий состав, системы внешнего и внутреннего освещения и т.д.), а также через оптимизацию режимов эксплуатации оборудования. Качество электроснабжения и условия использования энергии зависят от разных факторов, включая сопротивление электрических сетей, а также влияние некоторых видов оборудования и использования энергии на характеристики электроснабжения. В энергетических системах очень желательны стабильность напряжения, а также отсутствие искажений формы напряжения и тока.

На сегодня к основным критериям эффективности функционирования ЭЭС относят следующие:

- количество потребленной электрической энергии;
- потери электроэнергии в элементах систем электроснабжения;
- уровень напряжения;
- несимметрия и несинусоидальность напряжения;
- уровень высших гармоник.

Одним из главных векторов развития современной электроэнергетики является эволюционный переход от централизованной генерации электрической энергии к распределенным smart-системам генерации, использующих возобновляемые источники энергии. Их применение увеличивает маневренность потоков энергии, что приводит к повышению качества электроснабжения в условиях неравномерных графиков потребления электрической энергии. Распределенные системы генерации и накопления электроэнергии позволяют снизить материалоемкость ЭЭС, увеличить её надежность и живучесть за счет резервной энергии, запасенной в накопителях.

Таким образом, возникает необходимость пересмотра существующей практики проектирования и выбора оборудования систем электроснабжения различных потребителей. В существующей проектной практике сечение проводов выбирается по длительно протекающему току, мощность трансформаторов рассчитывается по среднему значению мощности потребителя с учетом неравномерности потребления. В реальных условиях эксплуатации оборудование системы электроснабжения используется не на полную мощность, что приводит к снижению энергоэффективности системы.

**Система электроснабжения жилого дома.** Рассмотрим, для примера [4], усредненный суточный график нагрузки на вводе в 62-квартирный дом с газовыми плитами (Рис. 1).

Как видно из графика, потребляемая мощность изменяется от 2 кВт до 15,5 кВт с максимумом нагрузки в вечернее время. Выбранные, в соответствии с нормативами, трансформатор и соответствующее сечение провода, в данном случае имеют избыточность и работают в номинальном режиме только в период максимума нагрузки. Если же выполнить выравнивание графика нагрузки, то можно сэкономить половину трансформаторной мощности и половину сечения проводов, то есть снизить материалоемкость системы электроснабжения и повысить ее эффективность.

Наиболее эффективно, на взгляд авторов, данную проблему могут решить накопители энергии, разрабатываемые и совершенствуемые в различных странах. Эти разработки становятся очень актуальными в связи с бурным развитием возобновляемых источников энергии. Накопитель позволяет запасать энергию ночью и днем, а вечером, в период пика потребления, отдавать мощность потребителям, не перегружая сеть.

На сегодня для маломощных систем электроснабжения применяются различные виды накопителей [5], обладающие различными техническими параметрами (таблица 1).

Известные типы аккумуляторов обладают рядом преимуществ и недостатков. Как правило, они либо очень тяжелы, либо дороги, либо имеют ограниченный диапазон рабочей температуры. Для кислотных и литий-ионных аккумуляторов плотность энергии находится в диапазоне  $30 \div 100$  Вт·ч/кг. Это можно считать приемлемым показателем, но число циклов заряд-разряд ограничено.

Для эффективного функционирования системы электроснабжения необходим накопитель, который бы имел высокий КПД цикла заряд-разряд, достаточное время хранения заряда, широкий диапазон рабочих температур, был недорог, безопасен в эксплуатации и в экологии. На сегодняшний день данным требованиям наилучшим образом отвечает накопитель энергии на основе принципа маховика. Считается, что маховик кольцевого типа способен накопить до 4 кВт·ч/кг, что более чем в 100 раз превышает плотность энергии для кислотного аккумулятора. Учитывая, что в маховике не используются дорогие материалы, можно считать, что стоимость накопителя будет не сильно превышать стоимость электродвигателя.

Применение таких накопителей очень разнообразно – их используют для сглаживания пусковых токов, для экономии ресурса аккумуляторов, можно накапливать энергию по низким тарифам и потреблять в другое время. Так же перспективно использование для систем оперативного управления электрических подстанций, вышек сотовой связи, систем автоблокировки и централизации, для пропуска тяжеловесных поездов и многое другое.

В настоящее время существует техническая возможность для создания нескольких типоразмеров накопителей в целях испытаний и проверки технологичности изготовления и безопасности. Оптимальным можно считать следующие параметры: емкость – 0,5 кВт·ч (столько энергии вырабатывает в среднем за день солнечная панель мощностью 100 Вт), выходное напряжение – 12 В (величина определяется стандартом напряжения на питание светодиодов и автомобильного оборудования), падение мощности – не более 20% за сутки, плотность энергии – не менее 0,03 кВт·ч/кг (плотность энергии кислотных аккумуляторов).

Маркетинговые исследования и практический опыт эксплуатации автономной энергосистемы с питанием от альтернативных источников энергии позволяют предположить, что наиболее востребованными параметрами устройства для накопления энергии на основе принципа супермаховика будут следующие: номинальное напряжение – 12 В постоянного тока, емкость накапливаемой энергии – от 0,1 до 0,5 кВт·ч, масса устройства – не более 20 кг. С учетом срока службы (20 лет против 5 лет у химических накопителей), коммерческий интерес данное устройство будет представлять при достижении параметра в 10 Вт на кг массы устройства. Это 0,25% от теоретической предельной емкости супермаховика. Работы над разработкой аналогичных устройств ведутся различными компаниями в разных странах мира.

Проводя оценочный графический расчет необходимой емкости накопителя для мощности, потребляемой в диапазоне значений от 8 до 15,5 кВт (рис. 1), получим значение 30 кВт·ч. Выбор оптимального места установки накопителей должен определяться техническими и экономическими расчетами, а также соображениями безопасности и надежности.

#### Система тягового электроснабжения.

Интеграция источников распределенной генерации (ИРГ) в систему тягового электроснабжения (СТЭ) требует разработки новых принципов проектирования, функционирования и управления режимами работы тягового электроснабжения [6]. Необходимость их разработки обусловлена следующими факторами: изменяется структура электрической системы, мощность генерации ИРГ определяется внешними факторами (в первую очередь интенсивностью солнечного излучения и ветрового потока) и мало зависит от режима работы электрической сети, к которой они подсоединены, установки ИРГ могут иметь колебательный или прерывистый характер генерации мощности, которая может привести к сильным колебаниям мощности в системе и влиять на режимы ее работы, большинство ИРГ подсоединены к сети с помощью силовых электронных преобразователей (инверторов), которые очень чувствительны к уровням напряжений. Отсюда, необходимо решать ряд вопросов: определение влияния ИРГ на стабильность работы тяговых подстанций, тяговых и других потребителей, которые присоединены к шинам тяговой подстанции с учетом допустимых режимов работы потребителей, разработка рекомендаций относительно особенностей

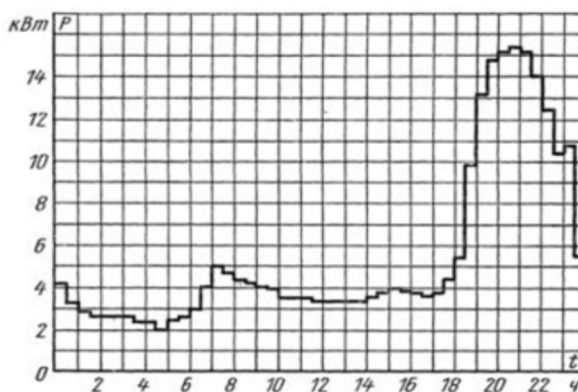


Рис. 1. Суточный график потребления мощности жилого дома

Таблица 1. Плотность аккумулируемой энергии в различных устройствах и материалах

Устройство (материал)	Плотность энергии Квт·час / кг		КПД, %
	без учета КПД и массы двигателя	с учетом КПД	
Водород	38.0	20.0÷23.0	50÷60
Бензин	13.0÷14.0	3.25÷4.2	25÷30
Свинцово-кислотный аккумулятор	0.025÷0.04	0.02÷0.039	96÷98
Гидроёмкость	0.0003	0.0002	64
Стальной маховик	0.05	0.049	96÷98
Маховик из углеродного волокна	0.215÷0.5	0.21÷0.49	96÷98
Маховик из кварцевого стекла	0.9	0.88	96÷98
Кольцевой маховик	1.4÷4.17	1.36÷4.0	
Сжатый воздух	2 (на 1 м³)	0.6÷0.8	

присоединения данного типа генерации к электрическим сетям железных дорог, функционирования устройств релейной защиты и автоматики, обеспечения необходимого уровня надежности электроснабжения потребителей с необходимыми качественными характеристиками, типа применяемого накопителя и места его установки.

Колебания токов, потребляемых электровозами в зонах питания тяговых подстанций (рис. 2), значительно влияют на изменение напряжения на токоприемниках электровозов, а также на шинах тяговых подстанций и в системе внешнего энергоснабжения. Уровень напряжения на токоприемниках электровозов зависит от изменения напряжений в первичной системе электроснабжения, схем питания электроподвижного состава (ЭПС), изменения числа поездов, которые одновременно находятся в зонах питания.

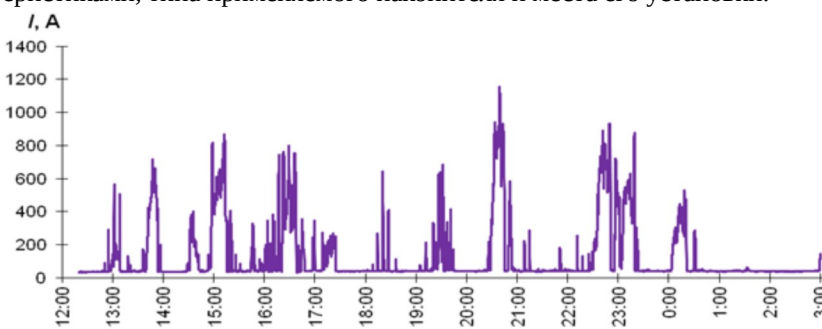


Рис. 2. График изменения тока фидера тяговой подстанции.

Необходимая мощность СТЭ зависит от многих факторов. Основные из них: масса поезда, скорость движения, основное сопротивление движения, интервалы между поездами, частота изменения режимов движения и разгона, возможность рекуперативного торможения, план и профиль пути, характеристики сети тягового электроснабжения. Современное состояние тягового электроснабжения постоянного тока характеризуется растущим дефицитом электрической энергии для обеспечения необходимого режима напряжения в тяговой сети при внедрении скоростного и высокоскоростного движения. Использование существующих средств усиления во многих случаях не обеспечивает необходимых энергетических показателей и является достаточно дорогим.

Растущий дефицит энергоресурсов ставит задачу исследовать возможность использования независимых источников электрической энергии для построения системы тягового электроснабжения распределенного типа. Можно считать, что на сегодняшний день схемотехника такой СТЭ отработана и предложенные варианты энергоэффективных систем тягового электроснабжения отвечают установленным критериям для внедрения высокоскоростного движения: обеспечивают поддержание необходимого уровня напряжения не ниже 2900 В, а также минимизируют потери мощности в тяговой сети [7-9].

Одним из вопросов, подлежащих решению в данных СТЭ и неисследованных до настоящего времени, есть обеспечение устойчивости системы по напряжению. Известно, что напряжение на токоприемниках электровозов при нормальной схеме питания межподстанционных зон изменяется в значительных пределах. При этом, чем большая мощность потребляется электровозом, тем больше пределы изменения. Оценка влияния устойчивости системы по напряжению имеет достаточно существенное значение на работу электроподвижного состава. Это определяется тем, что в ряде случаев резкие изменения напряжения могут повлечь чрезмерный рост тока двигателей и тяговых усилий. Особенно неприятные последствия могут при этом возникнуть в случаях работы электровоза в режиме рекуперативного торможения [10]. Точное решение поставленного вопроса чрезвычайно усложнено через сложность расчета нелинейных зависимостей, которые определяют режим работы ЭПС. При анализе устойчивости режимов по напряжению важно не только определить предельный режим и соответствующее ему критическое напряжение, но и исследовать, как именно влияют параметры системы тягового электроснабжения и режимы ее работы на величину критического напряжения. Именно такой анализ является основой для разработки эффективных мероприятий для предотвращения нарушений устойчивости по напряжению.

Наиболее часто улучшение режима напряжения выполняется за счет тривиальных малозатратных мероприятий, недостаточных при увеличении тяговых нагрузок, возникающих при увеличении скоростей движения. Из анализа приведенного ниже графика изменения напряжения на токоприемнике, полученного при проведении опытной поездки (рис. 3) следует, что его уровень, в основном, выше 3000 В, что соответствует установленным требованиям. Однако, при расчете коэффициентов запаса по напряжению получено, что система тягового электроснабжения соответствует условиям динамической устойчивости, так как значения коэффициента устойчивости не превышают 20% [11], а при расчете статической устойчивости участка имеет место превышение нормы, что предопределило необходимость проведения дополнительных расчетов.

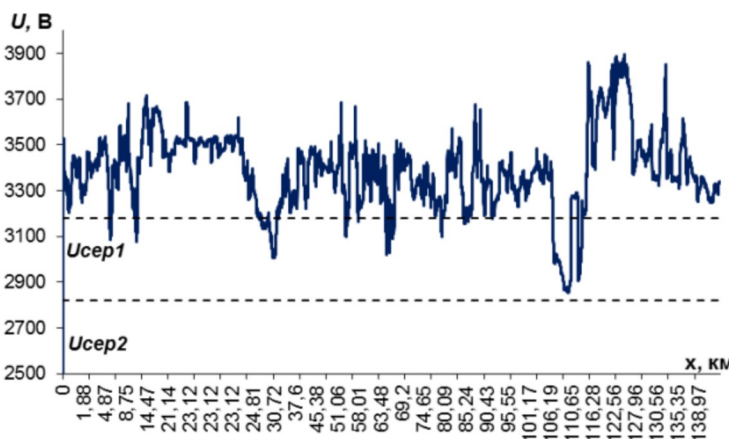


Рис. 3. Кривая напряжения на токоприемнике электровоза при движении на участке «П-Н».

Для более подробного анализа рассматривалась одна из подстанционных зон данного участка между подстанциями Ж и В длиной 23,4 км. Выбор дан-

ного участка был обусловлен наличием затяжного подъема. При проведении дополнительных вариантных расчетов было получено, что статическая устойчивость не удовлетворяет установленным требованиям от 23,49 до 42,2 км, при этом нарушение устойчивости имеет колебательный характер. Отсюда следует, что для обеспечения устойчивости СТЭ по напряжению следует или повышать напряжение на токоприемнике до длительно допустимого значения 3600 В [12] или применять несимметричную систему усиления тяговой сети.

#### **Выводы.**

1. Современные системы генерации, основанные на возобновляемых источниках энергии, находят все большее применение у потребителей различных категорий. По мере накопления опыта эксплуатации таких систем становится очевидно, что главная проблема состоит не в генерации электроэнергии, а в её накоплении.

2. Использование распределенной генерации в комплексе с накопителями энергии открывает новые горизонты развития энергетики. Возможно снижение сечения проводов, снижение мощности трансформаторных подстанций, или, наоборот, при тех же сечениях и мощностях передавать потребителю больший объем энергии без модернизации существующих сетей. Дополнительным преимуществом можно считать то, что при отсутствии внешнего электроснабжения система остается работоспособной определенный промежуток времени, что позволяет избежать отрицательных последствий.

3. Существенного улучшения режима напряжения в тяговой сети можно достичь использованием систем накопления электрической энергии, позволяющих уменьшить колебание потребляемой мощности и разнести во времени фазы накопления и отдачи электроэнергии, что позволит уменьшить диапазон изменения напряжения в тяговой сети и повысить экономические показатели функционирования СТЭ.

4. Исследование проблемы устойчивости по напряжению является фундаментом разработки технических мероприятий по планированию резервов мощности в системе тягового электроснабжения, направленных на повышение режимной безопасности в ней как сегодня, так и в ближайшей перспективе. Это позволит определить влияние запланированного расширения полигона скоростного движения, прогнозируемого роста нагрузки и запланировать изменения в структуре системы электроснабжения для обеспечения устойчивости перспективных режимов функционирования СТЭ.

6. Применяемые в настоящее время симметричные системы питания тяговой сети в некоторых случаях не обеспечивают устойчивой работы системы электроснабжения по напряжению.

**Список литературы:** 1. Овсейчук В. А., Жежеленко И. В. Экономически обоснованное нормирование надежности и качества электроснабжения потребителей в России. / В. А. Овсейчук, И. В. Жежеленко // Электрификация транспорта. – 2015. - № 10. - С. 117-123. 2. Концепция обеспечения надежности в электроэнергетике. / Н. И. Воропай, Г. Ф. Ковалёв, Ю. Н. Кучеров и др. – М.: ООО ИД «ЭНЕРГИЯ», 2013. - 212 с. 3. Бадер М. П. Концепция обновления и перспективы технического развития систем тягового электроснабжения. / М. П. Бадер., В. Г. Сыченко // Технічна електродинаміка, Темат. вип. Силова електроніка та енергоефективність. – 2009. - Ч. 2. – С. 88-93. 4. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://electricalschool.info/main/elsnabg/1190-sutochnye-grafiki-nagruzki-zhilykh.html>. 5. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=811>. 6. Сыченко В. Г. Интеграція сонячних електростанцій у систему тягового електропостачання постійного струму / В. Г. Сыченко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2015. – № 12 (1121). - С. 364-368. 7. Sychenko, Viktor. "Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current." The archives of transport 35.3 (2015): 63-70. Print. 8. Косарев С. М. Розробка керованого підсилюючого пункту для розподіленої системи тягового електропостачання / С. М. Косарев, В. Г. Сыченко, А. М. Муха, К. О. Хань // Електротехніка та електромеханіка. – 2016. - № 4 (1). – С. 89 – 93. 9. Сыченко В. Г., Косарев С. М., Губський П. В. та ін. Дослідження режимів напруги в системі тягового електропостачання постійного струму / В. Г. Сыченко, С. М. Косарев, П. В. Губський, В. В. Замаруєв, В. В. Івахно, Б. О. Стисло // Електрифікація транспорту. – 2016. - № 11. – С. 61-70. 10. Rojek, Artur. Traction power supply in 3 kV DC system. Warszawa: KOW media & marketing Sp. Z o.o., 2012. Print. 11. Стійкість енергосистем. Керівні вказівки : СОУ-Н МЕВ 40.1 – 00100227 –68: 2012.– Київ : ГРІФРЕ : Міненерговугілля України, 2012. – 35 с. 12. Аржанников Б.А. Тяговое электроснабжение постоянного тока скоростного и тяжеловесного движения поездов : монография/ Б.А. Аржанников. – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2012. – 207 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Ovseychuk, V. A. and Zhezhelenko, I. V. "Ekonomicheski obosnovanne normirovanie nadezhnosti i kachestva elektrosnabzheniya potrebiteley v Rossii." Elektrifikatsiya transportu 10 (2015): 117-123. Print. 2. Voropay, N. I., et al. Kontseptsiya obespecheniya nadezhnosti v elektroenergetike. Moscow: ООО ID «ЭНЕРГИЯ», 2013. Print. 3. Bader, M. P. and Sychenko, V. G. "Kontseptsiya obnoveniya i perspektivy tekhnicheskogo razvitiya sistem tyagovogo elektrosnabzheniya." Tekhnichna elektrodinamika, Temat. vip. Silova elektronika ta energoefektivnist' 2 (2009): 88-93. Print. 4. Web. 15 June 2017 <<http://electricalschool.info/main/elsnabg/1190-sutochnye-grafiki-nagruzki-zhilykh.html>>. 5. Web. 15 June 2017 <<http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=811>>. 6. Sychenko, V. G. "Integratsiya sonyachnikh elektrostantsiy u sistemu tyagovogo elektropostachannya postiyного струму". Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «Kharkivs'kiy politekhnichniy institut» 12.1121 (2015): 364-368. Print. 7. Sychenko, Viktor. "Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current." The archives of transport 35.3 (2015): 63-70. Print. 8. . Kosarev, S. M., et al. "Rozrobka kерованого підсилюючого пункту для розподіленої системи тягового електропостачання." Elektrotekhnika ta elektromekhanika 4.1 (2016): 89 – 93. Print. 9. Sychenko, V. G., et al. "Doslidzhennya rezhimiv napруги v sistemі tyagovogo elektropostachannya postiyного струму." Elektrifikatsiya transportu 11 (2016): 61-70. Print. 10. Rojek, Artur. Traction power supply in 3 kV DC system. Warszawa: KOW media & marketing Sp. Z o.o., 2012. Print. 11. Minenergovugillya Ukraini. Stiykist' energosistem. Kerivni vказivki : SOU-N MEV 40.1 – 00100227 –68: 2012. Kiiv: GRIFRE, 2012. Print. 12. Arzhannikov, B.A. Tyagovoe elektrosnabzhenie postoyannogo toka skorostnogo i tyazhelovesnogo dvizheniya poezdov. Ekaterinburg : Izd-vo UrGUPS, 2012. Print.

*Поступила 03.07.2017*